

Huella de carbono del reciclado en planta asfáltica en caliente con altas tasas de RAP

Carbon Footprint of Recycled Hot-Mix Asphalt with High Rates of RAP

Fecha de Recepción Artículo: AGOSTO 13 DE 2012
Fecha de Aceptación Artículo: SEPTIEMBRE 20 DE 2012

ÁNGEL SAMPEDRO

Investigador,
Universidad Politécnica de Madrid (UPM), España
E-mail: sampetro@uax.es

MIGUEL A. DEL VAL

Catedrático de Universidad
Universidad Politécnica de Madrid (UPM), España
E-mail: miguel.delval@upm.es

JUAN GALLEGO

Profesor titular de Universidad,
Universidad Politécnica de Madrid (UPM), España
(juan.gallego@upm.es)

NURIA QUEROL

Técnico, Grupo Sorigué
Lleida, España
E-mail: sampetro@uax.es

JULIO DEL POZO

Consultor, Grupo Sorigué
Lleida, España
E-mail: sampetro@uax.es



Resumen

Este artículo describe un análisis de huella de carbono (*Carbon Footprint*) desarrollado para la valoración, desde un punto de vista ambiental, del empleo de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) en la fabricación y puesta en obra de mezclas asfálticas en caliente. El análisis se ha llevado a cabo de forma específica para materiales asfálticos a partir de una metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) que ha considerado como unidad funcional la tonelada de mezcla asfáltica fabricada y colocada en obra, y como ecoindicador el kilogramo de CO₂ equivalente. La metodología presentada, además de basarse en datos de consumos y emisiones reales, considera dos aspectos fundamentales desde el punto de vista ambiental: la durabilidad y la reciclabilidad de las soluciones estudiadas. Por último, se exponen los resultados obtenidos con la aplicación de esta metodología a distintos tipos de mezclas asfálticas recicladas y a otras producidas mediante el reciclado de mezclas asfálticas con elevado contenido de caucho de neumáticos fuera de uso.

Palabras clave: Huella de carbono, análisis del ciclo de vida, reciclado, mezcla asfáltica

Abstract

This paper describes a *Carbon Footprint* analysis developed for the assessment, from the point of view of environmental impacts, of RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) used in the production and laying of hot-mix asphalt (HMA). This analysis has been developed specifically for asphalt mixes, based on a methodology of life-cycle analysis (LCA) considering as a functional unit the ton of asphalt produced and placed on site and as ecoindicator the kilogram of equivalent CO₂. Methodology presented in addition to data based on actual consumption and emissions, consider two fundamental aspects from the point of view of environmental impacts, durability and recyclability of the solutions examined. Finally, we present the results obtained from the application of this methodology to different types of recycled HMA,

and others produced through the recycling of asphalt mixtures with high content of rubber tires out of use.

Keywords: Carbon footprint, life-cycle analysis, recycling, hot-mix asphalt

Introducción

El presente artículo tiene por objeto describir la metodología que, de forma específica, basándose en el análisis de ciclo de vida (ACV), ha sido desarrollada para determinar la huella de carbono (*Carbon Footprint*) de la construcción de pavimentos asfálticos mediante la técnica de reciclado en caliente, empleando distintas proporciones de material procedente del fresado de las mezclas asfálticas envejecidas (RAP, *Reclaimed Asphalt Pavement*). Para esta aplicación la metodología del ACV se ha adaptado de forma específica, con el objeto de garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos y poder obtener así conclusiones válidas. En el momento actual, sin embargo, los ACV presentan aún incertidumbres y riesgos: existen numerosas metodologías susceptibles de aplicar a cada caso, lo cual lleva a resultados, en muchas ocasiones, dispares e incluso contradictorios [1]. La huella de carbono desarrollada se ha aplicado a mezclas asfálticas ensayadas en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Dichas mezclas han sido diseñadas y ensayadas para analizar la viabilidad técnica del reciclado en caliente con altas tasas de RAP y de mezclas asfálticas con elevado contenido de caucho precedente de neumáticos fuera de uso (NFU) [2].

Los resultados obtenidos consideran dos aspectos fundamentales: la durabilidad y la reciclabilidad de cada una de las soluciones analizadas. Para ello, los parámetros se han calculado de forma unitaria, es decir, la unidad funcional considerada ha sido la tonelada de mezcla asfáltica en caliente fabricada y colocada en obra (t HMA). De esta forma, no serán comparables con otras actividades ni habrá distorsiones por las diferencias que podrían suponer los distintos espesores de capas considerados; por otro lado, se considera que la durabilidad de

cualquier tonelada de mezcla asfáltica será, a priori, la misma. Por último, con el objeto de incorporar la reciclabilidad de los materiales, se ha considerado que los impactos de cualquier residuo o material reciclado empleado en el proceso son nulos [3].

Una de las innovaciones que supone el procedimiento desarrollado es el de estar basado en datos reales, medidos sobre instalaciones y obras representativas de estas técnicas de pavimentación en España, junto a otros contrastables y obtenidos de fuentes incontrovertibles [4]. Para poder aplicarla a cualquier tipo de obra todos los indicadores se han manejado en función de los parámetros o grados de libertad de los que se ha podido observar que dependen: distancias, potencia, rendimiento, tipo de combustible, etc.

Para el desarrollo de la metodología se puso en marcha en 2007 un sistema de recogida y análisis de datos que permitiera cuantificar los *inputs* y los *outputs* de los subsistemas considerados. Y se han realizado mediciones y controles de series de datos durante 2007, 2008, 2009 y 2010. Durante este tiempo, además, se han realizado estas mediciones para distintos tipos de obras (urbanizaciones, carreteras convencionales, autopistas, etc.) y con mezclas asfálticas en caliente con distintas granulometrías, todo ello con el objetivo de poder asegurar la representatividad de los datos manejados. En cuanto al control de *inputs*, se han medido y controlado materias primas (áridos, asfalto, cal, cemento, etc.) en todas las fases o subsistemas, consumos de combustibles y de electricidad y consumos de lubricantes. En lo referente al control de *outputs*, se han controlado los rechazos y residuos en todas las fases o subsistemas, así como las emisiones de gases en todos ellos. Aunque en algunos casos no se hayan podido medir las emisiones de gases, éstas pueden obtenerse del control de consumos de combustibles; de esta forma se han obtenido series completas de datos de emisiones de O_2 , CO_2 , SO_2 , NO , NO_2 , NO_x , CO , N_2O , HC , CH_4 , etc.

A partir de aquí, el siguiente paso fue la elección de un ecoindicador con el que plasmar los resultados. El problema de partida es que los ecoindicadores se obtienen a menudo a partir de datos poco fiables, y con métodos de cálculo muy complejos. Por

lo tanto, la elección del ecoindicador en el cual basar la metodología desarrollada, junto con el establecimiento de la unidad funcional a estudiar, ha sido el punto fundamental de partida; de su adecuada elección depende la fiabilidad de los resultados obtenidos, el nivel de sensibilidad de los análisis que puedan realizarse y, por consiguiente, el grado de cumplimiento de los objetivos para los cuales se ha desarrollado la metodología [5], [6], [7], [8]. En general, los ecoindicadores están referidos a los principales tipos de potenciales impactos sobre el ambiente y la salud humana a considerar: gases de efecto invernadero (GEI), energía, eutrofización, acidificación, formación de ozono troposférico, toxicidad, ecotoxicidad, etc.

En la presente metodología, se ha desechado la opción de un ecoindicador como los citados, debido a su complejidad, a la falta de datos reales para poder garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos, y a la subjetividad que la ponderación puede introducir. Además, en opinión de los autores, el hecho de considerar tantos y tan diversos parámetros provoca una pérdida de sensibilidad del modelo, de tal forma que pueda impedir el análisis de la eficiencia de posibles mejoras en los distintos subsistemas. En el caso de la unidad funcional considerada no hay riesgos graves de impactos sobre la salud humana y sobre el entorno, luego se puede prescindir de indicadores específicos. Por ello se ha decidido tomar como ecoindicador el *kilogramo emitido de CO_2 equivalente por tonelada de mezcla asfáltica ($kg\ CO_2\ eq / t\ HMA$)*.

Desarrollo de la metodología. Subsistemas considerados

La fase clave corresponde al *Inventario de ciclo de vida* (ICV) o inventario de cargas ambientales en las mezclas asfálticas en caliente (HMA), realizando los balances de materia y energía empleados tras definir correctamente el sistema estudiado y presentarlo mediante un diagrama de flujo donde deben aparecer todas las etapas del proceso. Como criterio general, el transporte entre etapas de proceso debe aparecer de forma agrupada como una sola actividad. Así, el sistema “mezclas asfálticas”, está compuesto por

subsistemas que deben evaluarse por separado. Estos subsistemas comprenden, por separado, los distintos procesos necesarios para su puesta en servicio, posterior funcionamiento en perfectas condiciones y demolición y retirada tras su vida útil.

Subsistema 1 “Producción de áridos”

Para la fabricación de cualquier tipo de mezcla asfáltica en caliente se emplean áridos cuya procedencia puede ser muy diversa y entre los cuales podría encuadrarse el RAP, cuyo papel es clave en el presente estudio. La metodología desarrollada trabaja en función de los datos de entrada que son las distintas proporciones en la mezcla de áridos naturales, triturados y de RAP que intervienen en cada fórmula de trabajo analizada. En esa metodología ya se está considerando la reciclabilidad de los materiales, pues sobre el porcentaje de RAP empleado sólo se computan las emisiones correspondientes a su tratamiento y manipulación en planta; de esta forma, es una fracción del árido que no permite reducir las emisiones correspondientes a su extracción y tratamiento [9]. Otras emisiones, que corresponderían al fresado necesario para su obtención y al transporte desde el punto de fresado a la planta, ya están consideradas en los subsistemas correspondientes. A partir de ellos se obtienen por separado las emisiones subtotales por cada tipo de árido y las emisiones totales. También se obtienen las emisiones que implican los distintos equipos o fases empleados, lo cual también puede ser de interés para, como se viene diciendo, poder establecer medidas eficaces de reducción de emisiones y consumos energéticos. Por ejemplo, para un caso de aplicación concreto, la muestra considerada como muestra patrón o de referencia, denominada “F0”, compuesta por un 90 % de árido triturado, y sin ningún porcentaje de RAP, el ICV del Subsistema 1 quedaría como se refleja en la Tabla 1.

Subsistema 2 “Fíller”

Dentro de los tipos de fílleres que pueden emplearse en las mezclas asfálticas se encuentran el propio de los áridos (fíller de recuperación) y también puede emplearse un fíller de aportación (polvo calizo o productos comerciales pulverulentos más activos, como cemento, cal apagada o cenizas

volantes de central térmica). Si las especificaciones no impiden emplear el fíller de recuperación, no cabe duda de que ello supone, a priori, grandes ventajas; pero no siempre es así y, en determinadas ocasiones, es necesario un fíller activo que mejore las prestaciones de la mezcla (por ejemplo, la mejora de la adhesividad con áridos silíceos para capas de rodadura). Otra posibilidad, que pocas veces se emplea, por razones de comodidad, es el empleo de una combinación de varios tipos de fílleres.

Tabla 1.

ICV del subsistema “Producción de áridos”

SUBSISTEMA 1: PRODUCCIÓN DE ÁRIDOS			
ETAPAS	kg CO ₂ eq/t áridos	kg CO ₂ eq/t HMA	Fuente
Extracción	3,310	3,01	ECRPD
Retroexcavadora	0,405	0,37	Sorigué
Dúmpster	0,322	0,29	
Planta clasificación	2,945	2,68	
Pala alimentación	0,330	0,30	
Trituración RAP	1,352	0,00	
Manipulación RAP	0,721	0,00	
TOTALES		6,65	

ECRPD: Proyecto europeo Energy Conservation in Road Pavement Design

Para el caso del fíller de recuperación, aquí se vuelve a considerar la reciclabilidad del material y, por lo tanto, sus emisiones unitarias son nulas, lo cual implica claras ventajas ambientales frente a las demás opciones. El fíller de aportación calizo se consideraría de manera análoga a un árido natural, aunque con un proceso de tratamiento algo más complejo (en este estudio se han obtenido las emisiones de forma similar a las del Subsistema 1).

Para el caso de la cal apagada y el cemento en España se dispone de datos fiables sobre las emisiones de CO₂ que implican los procesos industriales para su fabricación desde que estos sectores fueran incluidos en los planes nacionales de asignación (PNA) de cuotas de CO₂. Ahora bien, estas emisiones corresponden sólo

al proceso de fabricación de la cal o del cemento, y a ellas se deben sumar las emisiones correspondientes a la extracción y el tratamiento de los áridos procedentes de cantera que se emplean en su fabricación.

A la vista de los datos obtenidos puede apreciarse la diferencia de impacto que supone el empleo de cal o de cemento como fíller en una mezcla asfáltica. El caso del empleo de cal apagada como fíller podría implicar, a priori, desventajas desde el punto de vista de la sostenibilidad, pero aquélla tiene una superficie específica muy superior al resto de polvos minerales, de tal forma que, en los casos en que fuese utilizada, los porcentajes necesarios son mucho menores, con lo que las emisiones finales aportadas al proceso no son las que podría parecer en principio. En todo caso, debe tenerse presente que el empleo de estos tipos de fíller se realiza para resolver problemas concretos de las mezclas y su sobrecoste hace que realmente sólo se utilicen cuando son necesarios para alcanzar determinadas prestaciones finales.

Los datos de entrada, en este caso, son los porcentajes de cada tipo de fíller, en masa, sobre la HMA. De esta forma, para el caso concreto de la mezcla de referencia F0, en la que se ha empleado un 3,25 % de fíller de recuperación y un 1,53 % de cemento Portland, el ICV de este subsistema quedaría de la forma que se refleja en la Tabla 2.

Tabla 2.

ICV del subsistema "Fíller"

SUBSISTEMA 2: FÍLLER			
FÍLLER EMPLEADO	kg CO ₂ eq/t fíller	kg CO ₂ eq/t HMA	Fuente
Fíller recuperación	0,000	0,00	Considerado en "Planta"
Fíller aportación	3,995	0,00	Sorigué
Cemento Portland	883,310	13,51	OFICEMEN + UPM
Cal apagada	1.109,310	0,00	ANCADE + UPM
TOTAL		13,51	

OFICEMEN: Agrupación de fabricantes de cemento de España

ANCADE: Asociación nacional de fabricantes de cales y derivados de España

Subsistema 3 "Asfalto"

Dado que las refinerías de petróleo se pueden abastecer de distintos tipos de crudo, procedentes de diferentes partes del mundo, cualquier estimación de emisiones debe basarse en datos medios obtenidos del mercado para el que se está realizando el estudio [4]. Comparando y analizando diversas fuentes, se han considerado en este caso las emisiones unitarias proporcionadas por Eurobitume (Asociación europea de fabricantes de asfalto), que ha estimado los datos de emisiones unitarias correspondientes al refino y la manipulación del asfalto en las refinerías europeas. En la metodología aquí desarrollada, al tratarse de un ACV, se han estudiado también las emisiones correspondientes al proceso de extracción, transporte y manipulación del crudo hasta las refinerías (estas emisiones son mayores que las anteriores, incluyendo las llamadas emisiones fugitivas, que son aquellas emisiones de gases que se producen por fugas en trasvases, conducciones, etc.). Por lo tanto, están incluidas las emisiones de la extracción de crudo, su transporte a Europa, el refino para la producción del asfalto, y su almacenamiento y manipulación. Además, se ha tenido en cuenta también la posibilidad de empleo de aditivos o modificadores del asfalto, pues estos productos llevan también asociados grandes impactos. Para la determinación del ICV los parámetros de entrada son el porcentaje de asfalto, en masa, sobre la mezcla asfáltica, y los aditivos o rejuvenecedores empleados, por separado (Tabla 3).

Subsistema 4 "Planta asfáltica"

Para el control de los consumos energéticos y de las emisiones se han analizado tanto plantas continuas como discontinuas. Se ha dispuesto de datos tomados durante los años 2007, 2008 y 2009, para distintos tipos de obras, de mezclas asfálticas y distintos porcentajes de RAP. Se han controlado los consumos (combustibles, electricidad, etc.) y las emisiones (O₂, CO, CO₂, NO, NO₂, NO_x, SO₂, CH₄, etc.) para distintas obras, considerando distancias de transporte entre 10 y 40 km, distintos tipos de mezclas y distintos porcentajes de RAP (0, 15 y 50%).

Tabla 3.
ICV del subsistema "Asfalto"

SUBSISTEMA 3: ASFALTO			
ASFALTO EMPLEADO	kg CO ₂ eq/t asfalto	kg CO ₂ eq/t HMA	Fuente
Asfalto de penetración 50/70	277,000	11,97	EUROBITUME
Aditivos o modificadores	190,000	0,00	EUROBITUME
TOTAL		11,97	

EUROBITUME: Asociación europea del betún

Analizadas las series de datos manejadas se ha llegado a la conclusión de que los parámetros de los que dependen las emisiones de CO₂ de una planta asfáltica son la producción (t/h), que determina el régimen de funcionamiento, y el tipo de combustible empleado, que puede ser más o menos contaminante desde el punto de vista del ecoindicador considerado. Como puede apreciarse en la Figura 1, la variación de las emisiones de distintos gases conforme varía la producción de la planta es lineal, muy fácil de modelizar y de aplicar en la metodología desarrollada.

Otro de los parámetros con los que en un principio se pensó que podría estar relacionado el nivel de emisiones de CO₂ de la planta es la proporción de material de reciclado (RAP) incorporado, en la medida en que altera los consumos y el régimen de funcionamiento. Para los porcentajes de RAP más habituales, por debajo del 30 %, se ha comprobado que no hay variación apreciable de las emisiones, a igualdad del resto de factores. En el caso de mayores tasas de RAP, estas emisiones son mayores, debido a los consumos que implica el doble tambor. Para terminar de acotar el incremento de emisiones que pueden implicar los porcentajes de RAP empleados, debido al mayor calentamiento de los áridos vírgenes que debe realizarse, se han tomado nuevos datos y se

ha comprobado un sobrecalentamiento necesario en torno a unos 20 °C por encima de lo que supondría el no emplear ningún porcentaje de RAP en la mezcla. Para considerar este factor en la metodología desarrollada, se ha procedido a introducir una fórmula que, según el porcentaje de RAP empleado, estime el sobrecalentamiento necesario y, por lo tanto, el incremento de consumo energético que esto supone, obteniendo el exceso de emisiones de CO₂ equivalente que ello implica.

Finalmente, el otro parámetro que determina el nivel de emisiones de CO₂ es el combustible empleado. Así, el hecho de emplear fuel o gas natural (GNL) implica unas emisiones unitarias muy distintas (mucho mayor contaminación en el primer caso). Además, el hecho de instalar un sistema de cogeneración, que aproveche el calor excedente del calentamiento de los áridos, mejora aún más la eficiencia energética y, por lo tanto, reduce las emisiones de CO₂. Las instalaciones analizadas contaban con un sistema de cogeneración, lo cual ha permitido la evaluación de todas las soluciones posibles para el calentamiento de áridos y de asfalto, permitiendo obtener datos reales y contrastados.

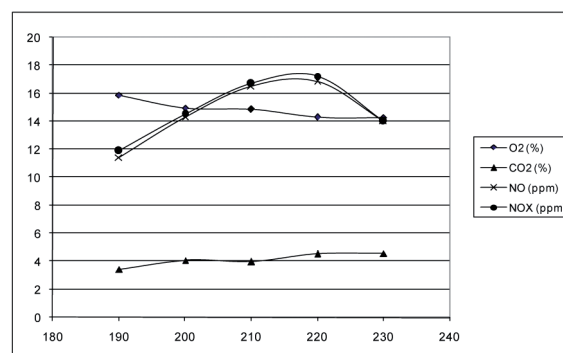


Figura 1.

Relación entre la emisión de gases y la producción de planta asfáltica.

Estos datos, con la serie de años analizada, han permitido calcular las emisiones unitarias por cada tipo de combustible, que son las que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4.

ICV del Subsistema "Planta asfáltica"

SUBSISTEMA 4: PLANTA ASFÁLTICA				
COMBUSTIBLES	kg CO ₂ eq/h	Producción t/h	kg CO ₂ eq/t HMA	Fuente
Gas Natural (GNL)	4.712,500	260	18,13	Sorigué
Fuel	6.271,460	0	0,00	
Cogeneración	2.290,860	0	0,00	
TOTAL			18,13	

Los valores para los casos de fuel y de cogeneración son finalmente nulos porque la planta que se ha utilizado como referencia se alimenta con gas natural.

El combustible empleado determina las emisiones de CO₂ del proceso de fabricación, de tal forma que el cambio de fuel a gas natural implicaría un ahorro de más del 28% de las emisiones en este subsistema. Además, la instalación de un sistema de cogeneración permitiría reducir un 53% adicional. Por último, es importante comentar que hay otros dos factores determinantes en los consumos energéticos de estos tipos de plantas que no se han podido considerar en este estudio: el grado de humedad de los áridos, especialmente la arena, y el número de arrancadas y de paradas producidos cada día en la planta.

Subsistema 5 "Puesta en obra"

La puesta en obra de las mezclas bituminosas en caliente comprenden, de modo genérico, las siguientes operaciones: preparación de la superficie existente, transporte del material desde la central de fabricación al lugar de extensión (esta tarea se incluye en el subsistema "Transporte", como es obligado en cualquier metodología de ACV), extensión de la mezcla y compactación. Se han ido controlando y realizando mediciones en distintas obras representativas de este tipo en España. Se han controlado todos los equipos

y fases necesarios para una correcta ejecución: todos los elementos de transporte, que han sido incluidos en el subsistema correspondiente, las máquinas fresadoras y barredoras necesarias para la preparación de la superficie, los equipos para los riegos de imprimación y de adherencia, el silo móvil de transferencia (*transfer*), la extendidora y los distintos equipos de compactación necesarios. Dentro de estas obras se ha realizado el control sobre distintos tipos de HMA y sobre distintos porcentajes de RAP. La mayor parte de las emisiones corresponden al transporte de materiales, pero estos resultados son para el ICV del subsistema Transporte, y no para el aquí descrito (Tabla 5).

Tabla 5.

ICV del Subsistema "Puesta en obra"

SUBSISTEMA 5: PUESTA EN OBRA HMA			
Equipos	kg CO ₂ eq/t HMA	kg CO ₂ eq/t HMA	Fuente
Fresadora	0,129	0,13	Sorigué
Cisterna emulsión	0,185	0,19	
Silo de transferencia	0,039	0,04	
Extendidora	0,554	0,55	
Compactador rodillos	0,277	0,28	
Compactador neumáticos	0,219	0,22	
Barredora	0,083	0,08	
TOTAL		1,49	

Subsistema 6 "Conservación"

Llegados a este punto no se ha creído necesario ni conveniente su consideración en el Inventario de Ciclo de Vida (ICV), debido a los siguientes motivos [5]:

- No tiene sentido para la unidad funcional considerada, la tonelada de HMA, pues no se trata de un pavimento o de una carretera, sino simplemente de la HMA como material de construcción. Por lo tanto, su evaluación ha de considerar sólo los subsistemas necesarios hasta su colocación y puesta en servicio, así como la demolición necesaria para poder dar por finalizada su “vida útil”.
- No sirve para los objetivos buscados con la presente metodología, pues la durabilidad y necesidades de conservación no dependen, al menos a priori, del porcentaje de RAP incorporado en la fabricación de la HMA.
- La consideración de este subsistema en el ICV incorporaría, además, nuevos elementos de incertidumbre. Por ejemplo, habría que plantear el período de vida útil de una HMA para evaluar los impactos de las distintas labores de conservación y de rehabilitación (15, 20, 25 años...), habría que analizar si la rehabilitación supone el fin del ciclo de vida total o parcialmente, etc.

Subsistema 7 “Demolición”

Cuando, tras la acción del tráfico y de los factores climáticos, las mezclas asfálticas alcanzan un cierto nivel de deterioro, deben ser retiradas para que el pavimento del que forman parte pueda prestar servicio en unas nuevas condiciones. Así, estas capas de pavimento ya agotadas se retiran mediante fresado, para ser repuestas con HMA nuevas. Estos materiales fresados (RAP) son los que dan lugar a las técnicas de reciclado de firmes, objeto de evaluación mediante la presente metodología. Como ya se ha visto en el ICV del Subsistema 5, en la realización del presente estudio se han controlado y medido (en distintas obras representativas) los consumos de los dos equipos que intervienen en este subsistema: la fresadora y la barredora. A partir de aquí, se han determinado las emisiones unitarias de CO₂ de dichos equipos, con lo que, introduciendo el número de ellos que se empleen, se obtienen las emisiones estimadas (Tabla 6).

Tabla 6.

ICV del subsistema “Demolición”

SUBSISTEMA 7: DEMOLICIÓN HMA		
Equipos	kg CO ₂ EQ/t HMA	Fuente
Fresadora	0,13	Sorigué
Barredora	0,08	
TOTAL	0,21	

Subsistema 8 “Transporte”

Tal como plantean las normas y recomendaciones al respecto, el transporte entre etapas de los procesos analizados, actividad fundamental a considerar, aparece en la metodología desarrollada de forma agrupada, como una sola actividad, en este último subsistema. Se han determinado las emisiones unitarias de CO₂ por kilómetro de los distintos medios de transporte utilizados. A partir de aquí, los grados de libertad o entradas del sistema son dos: las distancias recorridas por cada uno de ellos y la cantidad total de HMA fabricada y extendida, pues a partir de ella se calculan los viajes necesarios; por último, también se han considerado los transportes necesarios para el personal de las plantas y de las obras en sus desplazamientos (Tabla 7).

Resultados

El objeto de haber desarrollado la presente metodología de ACV es la de su aplicación al empleo de distintos porcentajes de RAP en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente y, más en concreto, a las fórmulas de trabajo concretas ensayadas por el Laboratorio del Grupo de investigación de Ingeniería de Carreteras I+D de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) dentro de la actividad 11 del Proyecto Fénix. Estas mezclas han sido diseñadas y ensayadas para analizar la viabilidad técnica del reciclado en caliente con altas tasas de mezclas asfálticas recuperadas (RAP) y de mezclas asfálticas con elevado contenido de caucho precedente de neumáticos fuera de uso (NFU).

Tabla 7.
ICV del subsistema "Transporte"

SUBSISTEMA 8: TRANSPORTE			
Elementos	Distancia (km)	kg CO ₂ eq/t HMA	Fuente
Camiones áridos-planta asfáltica	10,0	0,96	Sorigué
Cisterna asfalto-planta HMA	200,0	1,23	
Cisterna filler-planta asfáltica	80,0	0,17	
Camiones góndola para equipos	35,0	0,03	
Camiones para transporte HMA	35,0	3,69	
Vehículos personal	35,0	0,15	
Camiones recogida fresado	35,0	3,69	
TOTAL		9,91	

La primera de estas mezclas es la mezcla de referencia F0: es una mezcla convencional, en la que no se emplea ningún porcentaje de RAP. El resultado del ACV arroja los datos reflejados en la Tabla 8.

Con el objeto de analizar la viabilidad técnica del reciclado en caliente con altas tasas de mezclas asfálticas recuperadas de pavimentos ya reciclados, se han diseñado dos tipos de mezclas, la "F20", con un 20% de RAP, y la "F70", con un 70% de RAP. Aplicado el ACV, los resultados obtenidos,

comparándolos con los de la mezcla de referencia, son los que se reflejan en la Tabla 9.

Tabla 8.
Emisiones de CO₂ eq / t HMA para la mezcla de referencia F0

MEZCLAS UPM	F0 - 0% RAP	
SUBSISTEMAS	kg CO ₂ eq/t HMA	Porcentaje
Subsistema 1: Extracción y proc. áridos	6,65	10,7%
Subsistema 2: Filler	13,51	21,8%
Subsistema 3: Betún asfáltico	11,97	19,3%
Subsistema 4: Fabricación HMA	18,13	29,3%
Subsistema 5: Puesta en obra HMA	1,49	2,4%
Subsistema 7: Demolición	0,21	0,3%
Subsistema 8: Transporte	9,91	16,0%
TOTAL:	61,87	100,0%

Como puede apreciarse, se obtienen, en ambos casos, ahorros de emisiones de CO₂ equivalente. Para la F20, el ahorro es del 6,7 %, y para la F70, el ahorro llegaría al 13,5 %, para el caso concreto planteado. Este ahorro se debe, fundamentalmente, a la reducción del asfalto necesario y a la menor necesidad de extracción y procesamiento de áridos. Por el contrario, se aprecia que el sobrecalentamiento que requieren los áridos, debido al empleo de RAP, incrementa las emisiones de fabricación de la mezcla asfáltica.

Tabla 9
Emisiones de CO₂ eq para las mezclas F20 (20 % de RAP) y F70 (70 % de RAP)

MEZCLAS UPM	F0 - 0% RAP	F20 - 20% RAP		F70 - 70% RAP	
SUBSISTEMAS	kg CO ₂ eq/t HMA	kg CO ₂ eq/t HMA	Ahorro	kg CO ₂ eq/t HMA	Ahorro
Subsistema 1: Extr. y proc. áridos	6,65	5,78	13,1%	3,42	48,5%
Subsistema 2: Filler	13,51	12,72	5,9%	12,63	6,5%
Subsistema 3: Betún asfáltico	11,97	8,81	26,4%	5,09	57,4%
Subsistema 4: Fabricación HMA	18,13	19,26	-6,3%	22,05	-21,7%
Subsistema 5: Puesta en obra HMA	1,49	1,49	0,0%	1,49	0,0%
Subsistema 7: Demolición	0,21	0,21	0,0%	0,21	0,0%
Subsistema 8: Transporte	9,91	9,44	4,8%	8,60	13,3%
TOTAL:	61,87	57,71	6,7%	53,50	13,5%

Por otro lado, se ha realizado un análisis de la viabilidad técnica del reciclado en caliente de mezclas asfálticas con elevado contenido de caucho de neumáticos fuera de uso (NFU) recuperadas de pavimentos envejecidos. Para ello, se han diseñado dos tipos de mezclas: la "F20*", con un 20% de RAP-Caucho, y la "F50*", con un 50% de RAP-Caucho. Aplicado el ACV, los resultados obtenidos, comparándolos con los de la mezcla de referencia, son los que se reflejan en la Tabla 10.

Como puede apreciarse, aquí también se obtienen ahorros de emisiones de CO₂ equivalente debido

a los menores porcentajes de asfalto y volúmenes necesarios de áridos vírgenes. Para la F20* el ahorro es del 11,9 por ciento, mientras que para la F50* el ahorro sólo llegaría al 5,1 por ciento, para el caso concreto planteado. Esto se debe a que las mezclas recicladas tenían asfaltos modificados con caucho de NFU, en porcentajes muy elevados y a que, de la misma forma que en el caso anterior, se aprecia también que el sobrecalentamiento que requieren los áridos, debido al empleo de RAP, incrementa las emisiones de fabricación de la mezcla asfáltica.

Tabla 10.

Emisiones de CO₂ eq para las mezclas F20* (20 % de RAP-Caucho) y F50* (50 % de RAP-Caucho)

MEZCLAS UPM	F0 - 0% RAP	F20* - 20% RAP-C		F50* - 50% RAP-C	
SUBSISTEMAS	kg CO ₂ eq/t HMA	kg CO ₂ eq/t HMA	Ahorro	kg CO ₂ eq/t HMA	Ahorro
Subsistema 1: Extr. y proc. áridos	6,65	5,75	13,5%	4,30	35,3%
Subsistema 2: Fíller	13,51	12,63	6,5%	12,10	10,5%
Subsistema 3: Betún asfáltico	11,97	5,97	50,1%	10,42	13,0%
Subsistema 4: Fabricación HMA	18,13	19,32	-6,6%	20,98	-15,8%
Subsistema 5: Puesta en obra HMA	1,49	1,49	0,0%	1,49	0,0%
Subsistema 7: Demolición	0,21	0,21	0,0%	0,21	0,0%
Subsistema 8: Transporte	9,91	9,16	7,6%	9,25	6,7%
TOTAL:	61,87	54,53	11,9%	58,74	5,1%

En opinión de los autores es importante terminar subrayando que los resultados obtenidos están dentro de una sola de las componentes de la sostenibilidad, la ambiental, dejando fuera la componente social y la económica y, además, sólo se está considerando un factor ambiental: las emisiones de GEI. El empleo de distintos porcentajes de RAP en la fabricación de mezclas asfálticas puede comportar por tanto otras ventajas aquí no consideradas.

Conclusiones

- La aplicación del análisis del ciclo de vida requiere una adaptación específica para cada caso que se quiera estudiar, así como datos que sean absolutamente fiables, bien por la fuente de la que proceden o bien porque son el resultado de mediciones directas. Todo ello se ha tenido en consideración en el estudio presentado en este artículo.
- Para el caso de las mezclas asfálticas en caliente el análisis del ciclo de vida debe basarse en la determinación de un ecoindicador que permita comparar desde un punto de vista ambiental las distintas opciones de composición de la mezcla, de fabricación y de puesta en obra. Se ha considerado que el ecoindicador más apropiado es el kilogramo de CO₂ equivalente producido (que incluye todas las emisiones) por tonelada de mezcla asfáltica fabricada y colocada.

- Para el estudio del sistema “mezcla asfáltica fabricada y colocada” deben analizarse separadamente distintos subsistemas: áridos, filler, asfalto, planta asfáltica, puesta en obra, demolición y transporte (este subsistema se refiere a todos los transportes que puedan tener lugar en todas y cada una de las fases consideradas). Se debe excluir el subsistema “conservación” en la medida en que lo que se pretende es llevar a cabo el análisis de ciclo de vida de un material de construcción, no de una estructura de pavimento.
- La incorporación de RAP en la fabricación de las mezclas asfálticas en caliente supone una notable disminución en las emisiones de CO₂ equivalente, gracias sobre todo a los menores consumos de áridos y de asfalto, aunque en el subsistema “planta asfáltica” hay un incremento debido al mayor calentamiento requerido. Los ahorros han sido calculados con precisión para las distintas situaciones consideradas.
- Algo similar se puede decir con respecto al reciclado de mezclas asfálticas envejecidas fabricadas originariamente con polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso. También los ahorros han sido determinados con precisión en base a la metodología propuesta.

Agradecimientos

Este artículo recoge resultados de una investigación desarrollada en el marco del Proyecto Fénix, el cual ha sido posible gracias a la contribución financiera del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) del Gobierno de España, a través de su Programa CENIT. Las entidades que participan en el Proyecto manifiestan su reconocimiento por dicha contribución.

Referencias

- [1]. PARÍS, A., ORTIZ, J., MONCUNILL, C. (2005). Análisis de ciclo de vida y sostenibilidad en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente. Comunicación libre. Primera Jornada Técnica de la Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA). Madrid.
- [2]. SAMPEDRO, A., DEL VAL, M.A., BUISSON, J. (2009). Aplicación del análisis de ciclo de vida (ACV) para la valorización de la sostenibilidad del reciclado de mezclas asfálticas en caliente. XV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA). Lisboa.
- [3]. STRIPPLE, H. (2001). Life-cycle assessment of roads. A pilot study for inventory analysis. Segunda edición revisada. Informe del IVL (Swedish Environmental Research Institute). Gotemburgo.
- [4]. LANCASTER, I. M. (2009). Bitumen life-cycle & footprint. UK Technical Department, Nynas UK AB. Londres.
- [5]. CHOKI, S. (2005). Life-cycle assessment of road maintenance works in Sweden. Environmental engineering and sustainable Infrastructure (EESI) report. Estocolmo.
- [6]. MROUEH, U.M., ESKOLA, P., LAINE-YLIJOKI, J., WELLMAN, K. (2000). Life-cycle assessment of road construction. Finnra Reports 17/2000. The Finnish National Road Administration. Helsinki.
- [7]. TEMREN, Z., TORAMAN, S. (2006). A study on life-cycle analysis of asphalt pavements in Turkey. Documento técnico de la *Asphalt Contractors Association* de Turquía. Ankara.
- [8]. TRELOAR, G.J., LOVE, P.E.D., CRAWFORD, R.H. (2004). Hybrid life-cycle inventory for road construction and use. Journal of construction engineering and management – ASCE, 130. Reston (VA).
- [9]. VENTURA, A., MONÉRON, P., JULLIEN, A. (2008). Environmental impact of a bonding course pavement section with asphalt recycled at varying rates. Comunicación libre. EATA-2008 “Road and Pavement Design”. París.